

Актуальні питання нафтогазової галузі

УДК 551.44

ЗАКОНОМІРНІСТЬ РОЗВИТКУ ПРИПОВЕРХНЕВОГО КАРСТУ В ПИТАННЯХ НАДІЙНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НАФТО- І ГАЗОПРОВОДІВ

*Е.Д.Кузьменко, О.П.Вдовина, І.В.Чепурний**ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ, 76019, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 504761,
e-mail: kuzmenko@ivf.ukrpack.net, gbg@nung.if.ua*

Рассмотрена закономерность вероятности развития приповерхностного карста при комплексном воздействии природно-техногенных факторов. Установленные закономерности легли в основу созданной геоинформационной системы пространственно-временного прогнозирования развития поверхностных карстопоявлений, которая может использоваться как фактор надежной эксплуатации трубопроводов в карстоопасных районах.

Law of probability of development superficial karst is considered at complex influence of natural and technogenic factors. The established laws have laid down in a basis of the created geoinformation system of space-time forecasting development superficial karst which can be used as the factor of reliable maintenance of pipelines in karstic areas.

Значну частину території України уражено карстовими процесами. Всього в Україні зареєстровано понад 26000 поверхневих та підземних карстопоявів [1]. Основні регіони розвитку карсту – це Автономна республіка Крим (уражено 34,86% території), Львівська (19,33%), Тернопільська (9,36%), Чернігівська (8,76%), Івано-Франківська (7,87%), Волинська (7,6%), Хмельницька (2,91%) області [2]. Ділянки, що уражені карстом, займають значну площу і щороку збільшуються, завдаючи значних збитків. Частина карстових ділянок територіально пов'язана з розташуванням об'єктів нафтогазового комплексу України – магістральними газо- і нафтопроводами, компресорними станціями. В умовах розвитку карсту (особливо приповерхневого) трубопроводи можуть піддаватись значним механічним навантаженням, зумовленим поверхневими проявами карсту – просіданнями та деформаціями денної поверхні, катастрофічним утворенням поверхневих карстових форм – воронок та провалів. Неврахування карстонебезпечних умов території під час експлуатації та проектування трубопроводів може призвести до створення аварійних ситуацій на трубопроводах, що матиме негативні економічні та екологічні наслідки. Тому проблема дослідження та прогнозу карстових явищ є надзвичайно актуальною. В даній статті викладено результати досліджень з встанов-

лення закономірності просторово-часового розвитку карсту під дією комплексу факторів, що дає можливість створення системи прогнозування поверхневих проявів карсту.

Завданням просторового прогнозу є визначення областей можливих поверхневих проявів карстових процесів, інтенсивності та напрямленості цих проявів. Визначення закономірності просторового розподілу карсту базується на врахуванні впливу різноманітних природно-техногенних факторів.

Часовий прогноз приповерхневого карсту базується на аналізі часових рядів карстопоявів і ініціюючих їх факторів – геофізичних, гідрогеологічних та метеорологічних.

Теоретичні основи прогнозу екзогенних геологічних процесів (ЕГП) відображено в [3-6]. Проте конкретні приклади просторово-часового прогнозування ЕГП стосуються в основному зсувів та селів, щодо карсту наведено загальні міркування без зазначення конкретних карстоініціюючих факторів. У вітчизняній літературі останніх років присутня низка монографій і підручників з питаннями щодо прогнозування ЕГП, проте для поверхневого карсту спроби прогнозу в цих працях не розповсюджується далі просторових карт ураженості [7-10]. Те саме можна сказати про звіти геологічних підприємств, в яких зазвичай наводяться каталоги карстових проявів (що узагальнюють-

ся далі в ДНВП “Геоінформ України”) та знов таки карти ураженості із зазначенням умов розвитку карсту (відкритий, покритий, перекритий) [11].

Наукова новизна наведених досліджень, порівняно з відомими, полягає в кількісній імовірнісній оцінці карстових явищ. Дослідження в напрямку, що тут пропонується, відомі для зсувних процесів [12].

В загальному формулюванні, задачею, на вирішення якої спрямоване дане дослідження, є визначення закономірностей просторово-часового розподілу поверхневих карстопроявів з урахуванням впливу чинників їх активізації для створення регіонального прогнозу виникнення або активізації карсту, що дає змогу на кількісному імовірнісному рівні обґрунтувати можливість утворення карстових форм та імовірність їх активізації.

Поставлена задача вирішується, а технічний результат досягається за рахунок того, що проводиться оцінка комплексної дії сукупності просторових і часових факторів на процеси утворення карстопроявів з формуванням еталонної характеристики розподілу просторових і часових факторів прогнозованої території та визначається за еталонними характеристиками величина ймовірності інтегрального показника небезпеки виникнення або активізації карсту з урахуванням встановленої закономірності розвитку ЕГП в зв'язку з цими факторами.

Алгоритм просторово-часового прогнозу карстових процесів передбачає наступні етапи.

1. Створення бази даних карстопроявів, що включає їх координати, характеристики та розподіл виникнення чи активізації в часі.

2. Вибір та обґрунтування просторових та часових факторів активізації карстових процесів, їх розрахунок для поверхневих проявів карсту.

3. Побудова гістограм розподілу карстопроявів, визначення законів розподілу та їх уніфікація (приведення до нормального закону розподілу).

4. Нормалізація факторів, що передбачає переведення фізичних величин факторних характеристик в безрозмірні показники контрастності, з якими далі можна проводити лінійні математичні перетворення.

5. Розрахунок кореляції та виявлення дублюючих просторових факторів за допомогою кластерного та факторного методів аналізу, виявлення ритмів та кореляції рядів для часових факторів шляхом побудови автокореляційних функцій, функцій взаємної кореляції та проведення спектрального аналізу.

6. Оцінка інформативності факторів.

7. Розрахунок інтегральних показників.

8. Розрахунок та побудова ймовірнісної прогнозної функції. Для просторової складової ця процедура виконується шляхом розрахунку еталонної функції ймовірності, а для часової складової – шляхом розрахунку еталонного ймовірнісного ряду.

9. Розрахунок просторово-часової ймовірності виникнення карстових провалів як добут-

ку просторової та часової ймовірності в будь-якій точці в межах території досліджень.

Для експериментальних досліджень просторово-часового розвитку карстових процесів нами обрано ділянку розміром 50×65 км на території Львівської області, в межах якої зареєстровано 3549 карстопроявів (карстових воронок). Дана територія характеризується інтенсивним розвитком карбонатного (1285 воронок) і сульфатного (2264 воронки) видів карсту.

В тектонічному плані дана територія охоплює Передкарпатський прогин та південно-західну окраїну Східно-Європейської платформи.

Карбонатний карст має значне розповсюдження в межах крейдяних та неогенових відкладів південно-західної окраїни Східно-Європейської платформи (понад 11 тис км²) та виражається у вигляді давніх безстічних понижень, воронок, карстових полів, ярів, понорів та ін. Окремі ознаки активізації карсту пов'язані з гідротехнічним будівництвом, експлуатацією водозаборів, розробкою кар'єрів.

Сульфатний карст має значне розповсюдження в зоні контакту Передкарпатського прогину та платформи площею понад 2,5 тис. км². В зоні повного та часткового прорізання карстуючої товщі водотоком інтенсивно розвивається природний карст. У разі техногенної зміни гідрогеологічних умов і формуванні ділянок агресивного руху підземних вод від зон живлення до зон розвантаження відбувається розмив існуючих та заповнених глининою порожнин з катастрофічним утворенням техногенно зумовлених воронок [10].

Розвиток карсту на даній території пов'язаний з поширенням верхньобаденських відкладів – тираської світи, яка в своєму складі містить гіпсангідритовий горизонт, перекритий пелітоморфними та кристалічними вапняками. Відклади тираської світи узгоджено перекриваються карбонатно-глинистими породами косівської світи, яка також відноситься до верхнього баденію. Сучасні умови залягання та розкриття міоценових відкладів денудаційною поверхнею закономірно змінюються в напрямку від платформи до прогину. Важливою рисою зони зчленування платформи з прогином є її роздрібненість системою поздовжніх і поперечних розломів і блоково-ступінчасте занурення тираської світи в сторону прогину, з одночасним ростом потужності косівських та сарматських глинистих відкладів і зменшенням глибини денудаційного вскриття розрізу. Ці геолого-геоморфологічні особливості зіграли важливу роль в еволюції гідрогеологічних умов міоценової товщі, визначаючи хід гіпергенних процесів в ній, зокрема процесів карстоутворення. В роботі [13] перебіг карстових процесів в товщі тираської світи пояснюється теорією висхідного водообміну.

Карстові явища належать до екзогенних геологічних процесів. Їхні прояви контролюються рядом природних і антропогенних факторів. Загальновизнане визначення основних умов утворення карсту наведено в роботі [14]:

«Як геологічний процес, карст неухильно розвивається там, де існують одночасно наступні чотири умови: розчинність гірських порід, їх водопроникність, наявність рухомих вод, їх розчинна здатність».

В кожному окремому випадку сукупність основних умов розвитку карсту характеризується великою різноманітністю. Вона залежить від багатьох факторів і змінюється в часі, визначаючись для кожної області її геологічною історією. Наведені чотири умови виникнення і розвитку карсту є обов'язковими і необхідними, але процес карстоутворення пов'язаний із низкою супутніх природних процесів та явищ.

Виходячи з теоретичних уявлень про процес карстоутворення, а також з об'єктивності впливу чинників в регіональному масштабі нами запропоновано наступні кількісні характеристики в точках карстопроявів для таких ймовірних чинників карстоутворення:

геологічні – літологічний склад четвертинних відкладів, геологія дочетвертинних відкладів, відстань до тектонічного порушення;

геофізичні – значення гравітаційного поля;

геоморфологічні – абсолютна висота над рівнем моря карстопрояву, кут нахилу земної поверхні, відстань до базису ерозії;

гідрогеологічні – глибина залягання ґрунтових вод, водопровідність четвертинних відкладів, водопровідність неогенових відкладів, глибина водоупорів у товщі четвертинних і міоценових відкладів, наявність і тип першого від поверхні водоупору, потужність порід до першого від поверхні водоупору, потужність першого від поверхні водоупору, значення гідроізопіс четвертинного та міоценового водоносного горизонту, ізопотужності четвертинного та міоценового водоносних горизонтів, катіонний, аніонний склад і мінералізація підземних вод четвертинного водоносного горизонту;

інженерно-геологічні – відстань до найближчого карстопрояву;

техногенні – відстань до ділянок порушення геологічного середовища (кар'єрів, водозаборів), відстань до населеного пункту.

Однією з основних проблем створення просторового прогнозу є відбір з великої кількості ініціюючих факторів дублюючих, а також тих, які не несуть в собі достатню інформативність. Це досягається шляхом послідовного застосування методів математичної статистики, а саме визначення законів розподілу значень чинників, кластерного та факторного методів аналізу, що дають змогу визначити дублюючі чинники й провести їх класифікацію. Аналіз матриці коефіцієнтів кореляції визначає суттєвість впливу кожного з факторів.

Після проведення зазначеного вище попереднього статистичного аналізу, виходячи з уявлень про перебіг процесу поверхневого карстоутворення, а також на основі аналізу відповідних літературних джерел відібрано найбільш вагомні факторні характеристики, що контролюють просторове поширення поверхневих проявів карсту. До них відносяться:

- значення гравітаційного поля в редукції Буге;
- R_i геологічних світ дочетвертинних відкладів;
- відстань до тектонічного порушення;
- відстань до базису ерозії;
- водопровідність четвертинних відкладів;
- водопровідність неогенових відкладів;
- потужність першого від поверхні водоупору;
- значення гідроізопіс міоценового та четвертинного водоносних горизонтів;
- ізопотужності міоценового та четвертинного водоносного горизонту;
- відстань до населеного пункту;
- відстань до ділянок порушення геологічного середовища (кар'єрів, водозаборів);
- R_i зон типу першого від поверхні водоупору;
- R_i літологічних зон четвертинних відкладів;
- відстань до найближчого карстопрояву.

Для площинних факторів (біля яких покладено позначку R_i) застосовується кількісна характеристика, яка характеризує ураженість території карстовими процесами – коефіцієнт контрастності R_i .

За результатами розрахунків коефіцієнта контрастності виконується ранжування залежно від внеску кожної зони в суму коефіцієнтів контрастності, що дає змогу врахувати ці чинники в інтегральному показнику ймовірності карсто-небезпеки, а також процедура нормалізації.

Застосування кластерного та факторного методів аналізу дає можливість підтвердити значимість кожного з факторів для процесу карстоутворення, встановити та вилучити дублюючі фактори.

З метою розрахунку сумарного показника активності розвитку поверхневих карстопроявів виконано процедури визначення вагових коефіцієнтів інформативності (приведених загальних коефіцієнтів кореляції) для кожного з чинників $R_{пр}$. Їх визначають з метою підтвердження правильності вибору факторів та визначення інформативності кожного з них.

Отриманий розподіл ймовірності значень інтегрального показника свідчить про високий ступінь його наближення до теоретичного нормального закону розподілу. Далі з використанням функції Лапласа розраховуються значення ймовірності процесу розвитку карсту для території досліджень. Оптимальні умови для утворення поверхневих карстопроявів настають тоді, коли значення ймовірності розподілу комплексного інтегрального показника, що враховує вплив факторів різної природи, досягає свого максимуму.

Для виявлення часового розподілу розвитку сульфатного карсту для території досліджень використовувались річні ряди активізації карсту та обумовлюючих його факторів: річної кількості опадів, середньорічної температури, сонячної активності (ряд чисел Вольфа), енергії землетрусів, рівня ґрунтових вод. На зв'язок

ЕГП із зазначеними факторами в загальних рисах вказують автори [4-6].

Далі послідовно реалізовано процедури, зазначені в алгоритмі досліджень – розрахунок автокореляційних функцій (АКФ) і функцій взаємної кореляції (ФВК), а також побудовано періодограми для карстопроявів і всіх головних факторів. Аналіз АКФ свідчить, що по карстопроявах періодичність складає 5 і 10 років.

По факторах карстової активності періоди, що наближені до карстопроявів, такі: число Вольфа – 9-11 років, логарифм енергії землетрусів – 11-12 років, кількість опадів – 9-10 років, температура – 11 років, рівень ґрунтових вод – 10 років. Зважаючи на відносно короткі ряди, можна зробити висновок про узгодженість основних періодів. Для підтвердження цього висновку, а також для уточнення періодів проведено спектральний аналіз рядів, результат якого сумнівів не лишає – основні періоди для карстопроявів і всіх факторів – 5 і 10 років.

Аналіз ФВК однозначно свідчить про наявність кореляції часових рядів карстопроявів і всіх запропонованих факторів. Фізично змістовним є факт затримки прояву карсту відносно карстоініціюючих факторів. Це зміщення враховане під час розрахунку і побудови графіка функцій комплексного інтегрального показника ФКП.

Заключним етапом є розрахунок прогнозного інтегрального параметра, отриманого шляхом сумування рядів нормалізованих значень параметрів з урахуванням їх інформативності. Прогнозний ряд активізації карстопроявів розраховано до 2020 року двома способами. Перший спосіб полягає в осередненні значень ймовірності карстопроявів по головній гармоніці в 10 років. Другий спосіб базується на аналізі Фур'є, прогнозу криву побудовано сумациєю основних гармонік інтегрального показника, в даному випадку це гармоніки з періодами 10 та 5 років. Зважаючи на фактичний ряд в 33 роки (1971-2003), прогноз зроблено на $33/2 \approx 17$, тобто до 2020 р. Прогнозні ряди, побудовані за різними методиками, співпадають між собою в ритмічності та в значеннях ймовірності карстопроявів. За результатами аналізу рядів можна стверджувати, що 2007-2011 роки – це роки затишшя в карстоутворенні з ймовірністю виникнення воронки 0,2-0,3; далі, починаючи з 2012-2013 рр., процеси розвитку карсту та його проявів активізуються і досягнуть максимуму в 2014-2015 рр. за ймовірності 0,95; далі починається спад активності із затишшям в 2018-2020 роках.

Проведені дослідження із встановлення закономірності розвитку приповерхневого карсту знайшли своє практичне втілення в геоінформаційній системі просторово-часового прогнозу карстових процесів. Систему створено в середовищі ГІС MapInfo. Вона дозволяє створювати середньо або дрібномасштабні регіональні прогнозні карти ймовірності утворення карстових провалів для заданої території досліджуваного району. Також реалізовано можливість одержання інформації про ймовірність утворення

карстопрояву в конкретній точці досліджуваного району як в перспективі так і в ретроспективі.

Створена система дозволить оперативно оцінювати карстонебезпечність заданої території для здійснення ефективного управління територією, зокрема її можна використовувати на стадії проектування трубопроводів з метою обрання найбільш безпечного варіанту прокладання траси трубопроводу в умовах карстонебезпечних територій.

Похибка просторового прогнозу визначається масштабом використаних карт для визначення просторових факторів. Дослідження проводились в регіональному масштабі з використанням карт масштабу 1:200 000, якому відповідає похибка $\pm 0,7$ мм карти, що відповідає ± 140 м на місцевості. Похибка часового прогнозу визначається детальністю задіяних часових рядів. Для довгострокових прогнозів визначаються середньорічні фактори, тобто похибка становить $\pm 0,5$ року.

Висновки

1. В результаті проведення досліджень встановлено невідому раніше закономірність розвитку приповерхневого карсту при комплексній дії природно-техногенних факторів на прикладі експериментальної ділянки на території Передкарпаття.

2. Встановлено, що просторовими факторами активізації карсту в даній місцевості є тектонічні, геологічні, гідрогеологічні, геоморфологічні, геофізичні, а часовими – геофізичні, гідрогеологічні і метеорологічні.

3. Ймовірність виникнення провалів на поверхні Землі, як показника активності розвитку приповерхневого карсту визначається ймовірнісним інтегральним показником, який враховує сукупний вплив просторово-часових домінантних факторів карстоутворення для даної місцевості.

4. Встановлена закономірність розвитку карсту є основою для створення регіональної системи просторово-часового прогнозування карстових процесів.

5. Зазначений прогноз дає змогу визначити ступінь просідання денної поверхні вздовж трас нафто- і газопроводів та інших промислових споруд і вжити необхідних заходів для попередження аварій.

Література

1 Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2005 році [Текст] / Міністерство України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи. – К.: ДП “Агентство “Чорнобильінформ”, 2006. – 242 с.

2 Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2006 році [Текст] / Міністерство України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту насе-

лення від наслідків Чорнобильської катастрофи. – К.: ДП “Агентство “Чорнобильінформ”, 2007. – 236 с.

3 Методы долговременных региональных прогнозов экзогенных геологических процессов [Текст] / [под ред. А.И. Шеко, В.С. Круподерова]. – М.: Недра, 1984. – 167 с.

4 Долговременные прогнозы проявления экзогенных геологических процессов [Текст] / [под ред. В.Т. Трофимова]. – М.: Наука, 1985. – 152 с.

5 Методические рекомендации по составлению долгосрочных прогнозов экзогенных геологических процессов в системе государственного мониторинга геологической среды [Текст] / [А.И. Шеко, Г.П. Постоев, В.С. Круподеров и др.]. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1999. – 78 с.

6 Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика [Текст] / В.Д. Ломтадзе – Л.: Недра, 1977. – 479 с.

7 Адаменко О.М. Основы экологической геологии [Текст] / О.М. Адаменко, Г.И. Рудько – К.: Манускрипт, 1995. – 211 с.

8 Рудько Г.І. Екологічна безпека техноприродних геосистем (наукові та методичні основи) [Текст] / Г.І. Рудько, С.В. Гошовський – К.: ЗАТ “Нічлава”, 2006. – 464 с.

9 Гайдін А.М. Сульфатний карст та його техногенна активізація (на прикладі Карпатського регіону України) [Текст] / А.М. Гайдін, Г.І. Рудько. – К.: Товариство «Знання» України, 1998. – 76 с.

10 Адаменко О.М. Екологічна геологія [Текст]: підручник / О.М. Адаменко, Г.І. Рудько – К.: Манускрипт, 1998. – 349 с.

11 Узагальнення матеріалів по вивченню екзогенних геологічних процесів по території діяльності підприємства та інженерно-геологічне довивчення території Львівської та частково Закарпатської областей з метою геологічного обґрунтування протизсувних заходів та геологічного забезпечення УІАС НС [Текст]: звіт про науково-дослідну роботу / [Т. Стахів, В. Павлюк, І. Гаврилишин та ін.]. – Львів: ДП “Західукргеологія”, 2006. – 299 с.

12 Прогноз розвитку зсувних процесів як фактор забезпечення надійності експлуатації трубопроводів [Текст] / Е.Д. Кузьменко, Є.І. Крижанівський, О.М. Карпенко, О.М. Журавель // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. – № 4(17). – С. 24-35.

13 Климчук А.Б. Роль спелеогенеза в формуванні серних месторождений Предкарпатья [Текст] / А.Б. Климчук – Симферополь: ДИАИПИ, 2008. – 64 с.

14 Соколов Д.С. Основные условия развития карста [Текст] / Д.С. Соколов – М.: Госгеолтехиздат, 1962. – 321 с.